

小惑星の軌道・自転のダイナミクスと非重力効果

○金丸 仁明¹、岡田 達明¹、
はやぶさ2・Hera 熱赤外カメラチーム

¹ISAS/JAXA

小惑星の軌道・自転のダイナミクスと非重力効果

1 小惑星の力学と熱物理

- 自己紹介
- Yarkovsky 効果について

2 Hera に向けた科学検討

3 小惑星の軌道変更と非重力効果

金丸 仁明 Masanori KANAMARU

経歴

2015	大阪大学・理学部物理学科 卒業
2017	大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻・修士課程 修了 ▶ 指導教員：佐々木 晶 教授
2020	大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻・博士課程 修了 ▶ 指導教員：佐々木 晶 教授
2020-現在	博士研究員@宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 ▶ 新学術領域研究『水惑星学の創成』 ▶ 受入教員：臼井 寛裕 教授・岡田 達明 准教授



研究テーマ

● 小惑星の地質と力学

小惑星Itokawa内部の密度分布 [Kanamaru & Sasaki, 2019; Kanamaru+2019]

● 小惑星の熱物理と力学進化

小惑星Ryuguの自転進化史 [Kanamaru+2021]

共同研究

- はやぶさ2 (光学航法カメラ・熱赤外カメラ)
- ニース天文台 (Dr. M. Wicczorek)
- コロラド大学 (Prof. D. J. Scheeres)
- Hera - Working Group 4 - NGA, Co-Lead (Lead: Dr. G. Tommei)

小惑星探査と Planetary Defense

小惑星 Bennu の軌道決定

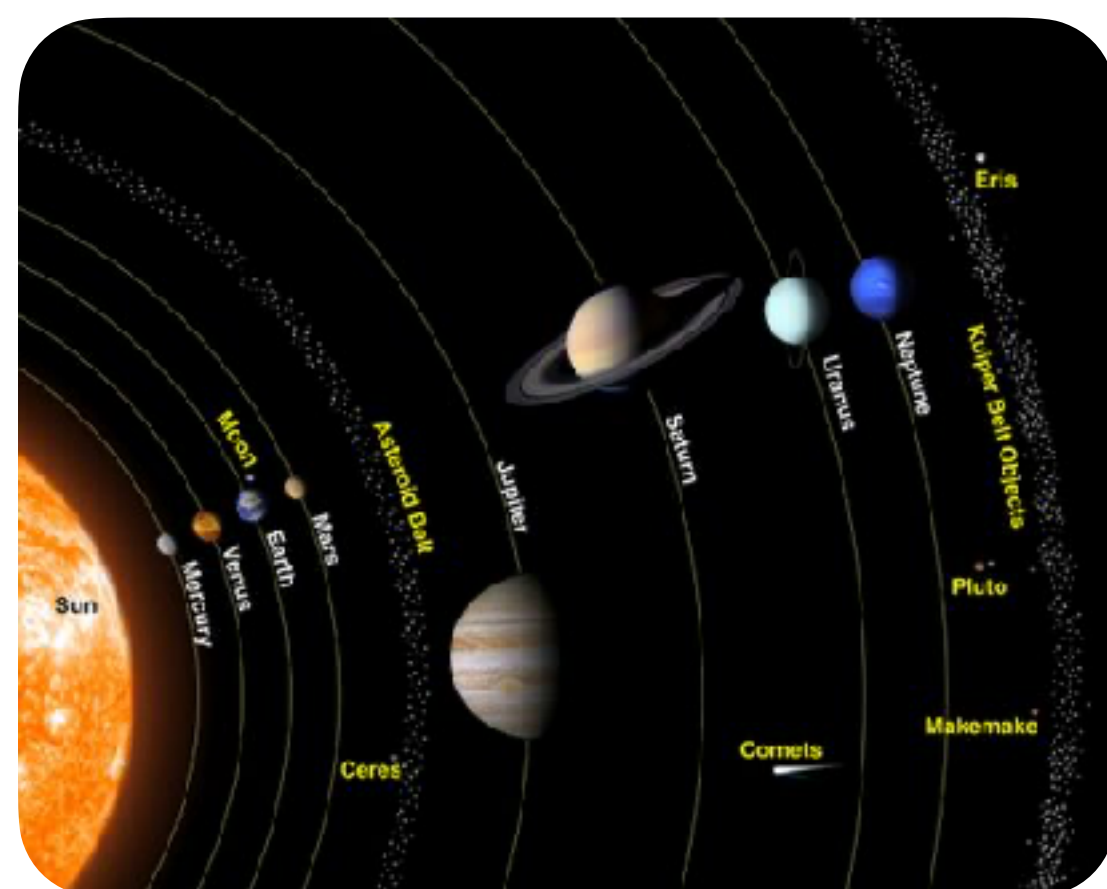
- 潜在的に危険な小惑星 (Potentially hazardous asteroid, **PHA**)
- OSIRIS-RExの観測によって、天体暦が精密に決定された [Farnocchia+2021]
 - ➡ 西暦2300年までにBennuが地球に衝突する確率が推定された (1750分の1)
 - ➡ 最も衝突確率が高いのは、西暦2182年の接近 (2700分の1)

小惑星の軌道予測に必要なもの

- 光学観測・レーダー観測・惑星探査を通して、**マルチスケールの物理特性**を知る必要がある。
e.g., 軌道、自転、天体サイズ、質量、形状、熱物性、表面凹凸...
- 重力に加えて、**非重力効果**のモデリングが重要である。
e.g., Yarkovsky and YORP effects, solar radiation pressure, Poynting–Robertson drag

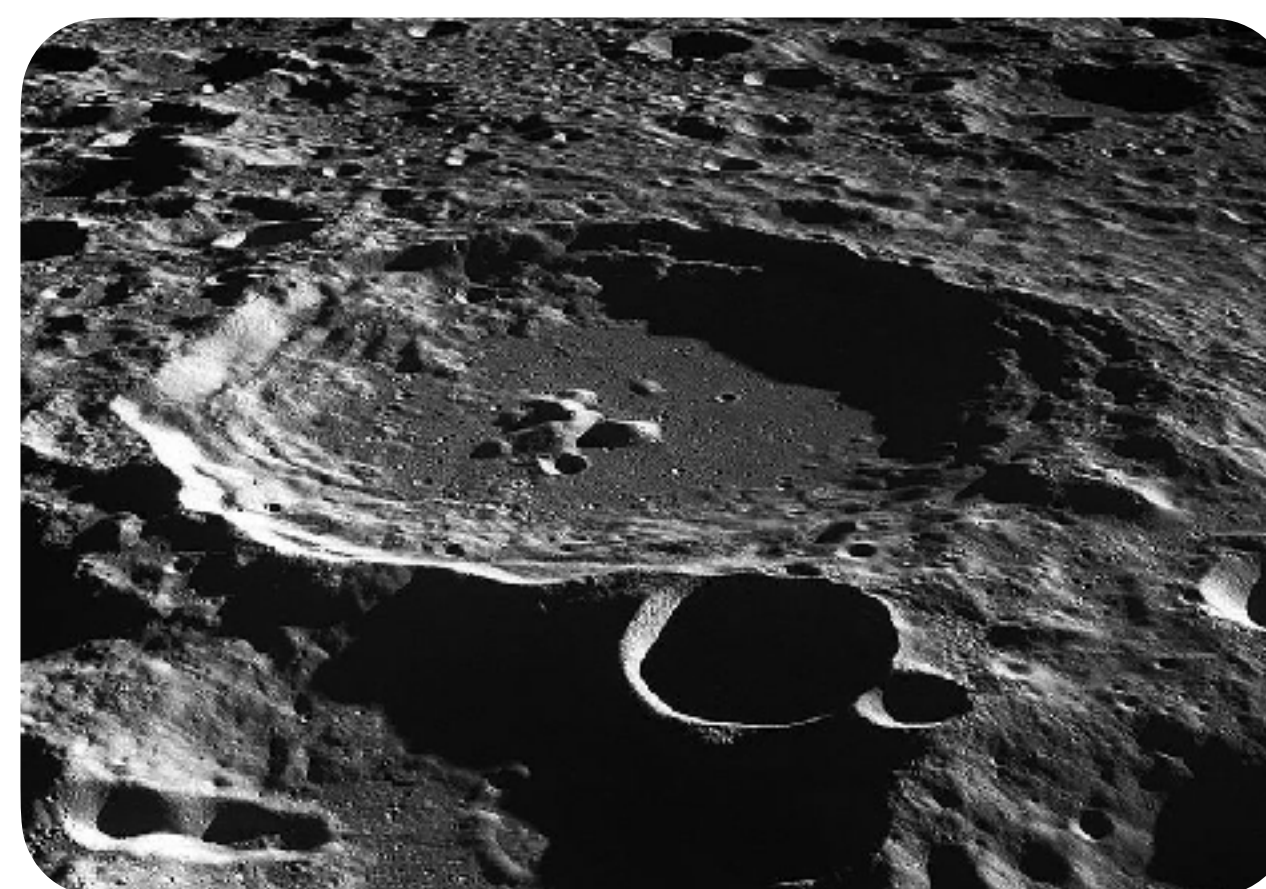
小惑星の力学進化

惑星との重力相互作用



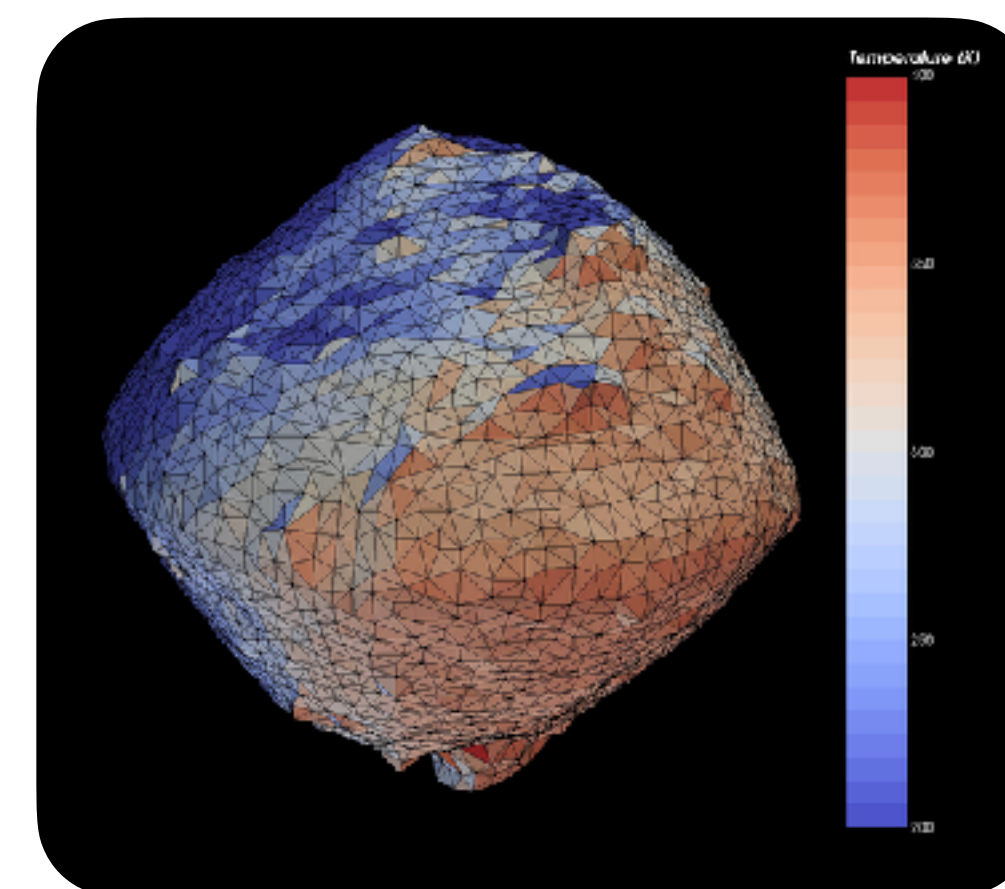
- 平均運動共鳴、永年共鳴
- 惑星との近接遭遇

天体衝突



- 天体のサイズ頻度分布
- 組成や物性の変化

非重力効果



- 軌道に対する **Yarkovsky** 効果
- 自転に対する **YORP** 効果

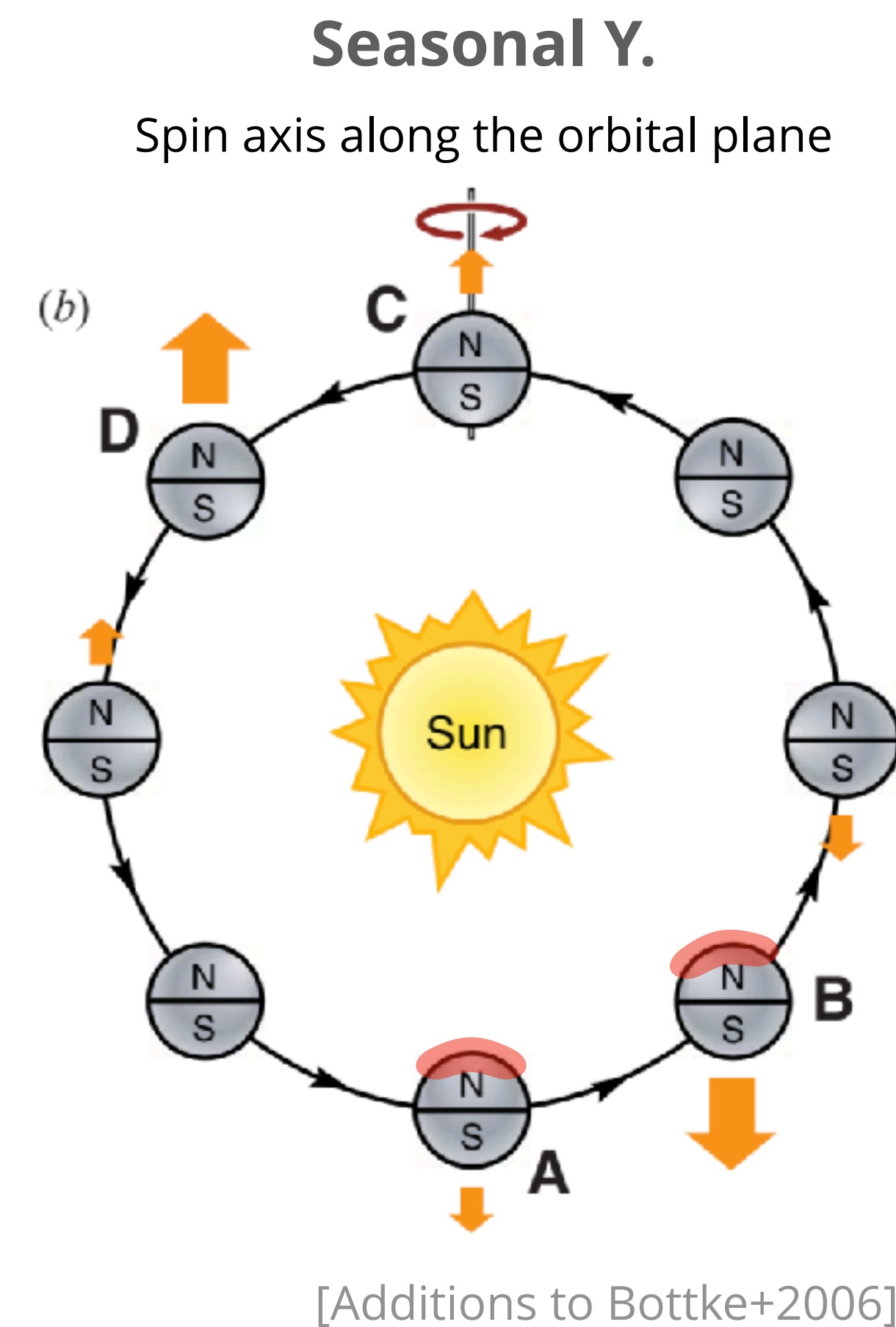
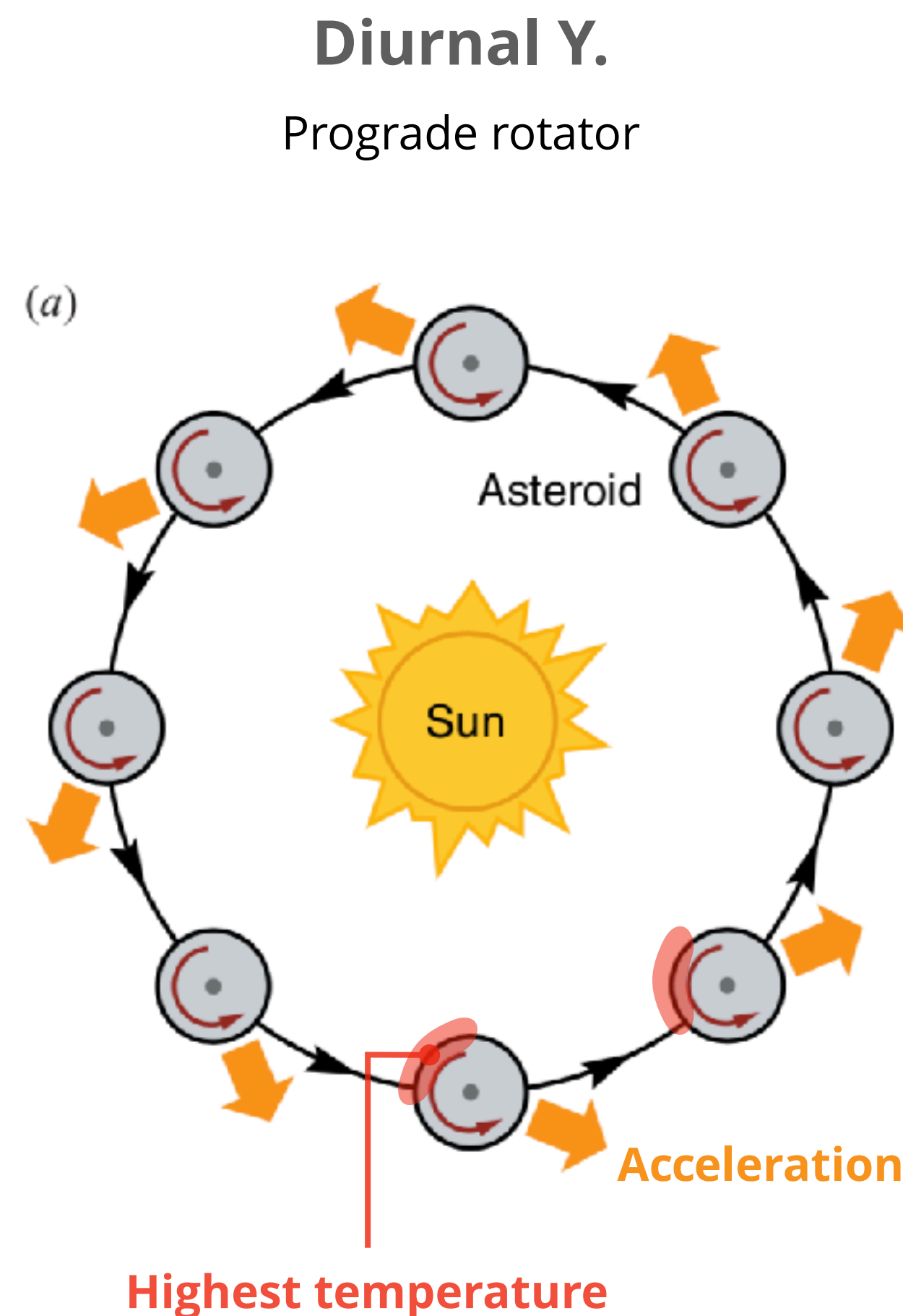
Yarkovsky 効果 = 熱放射による小惑星の軌道進化

Diurnal Yarkovsky

- 熱慣性によって、最高温度に達する地点は太陽直下点からずれる
 - 放出される光子の反作用はキャンセルしない
 - ➡ **順行自転**：軌道長半径 a が大きくなる
 - ➡ **逆行自転**：軌道長半径 a が小さくなる
- Ryuguは、逆行自転（赤道傾斜角 $\epsilon = 172^\circ$ ）に相当する

Seasonal Yarkovsky

- 自転軸が横倒しの天体では ($\epsilon = 90^\circ$)、公転によって南北半球の温度非対称が生じる
- 軌道長半径 a が小さくなる



大気のない固体天体表層の熱物理

小惑星の表面温度

- 太陽光の入射・地下への熱伝導・熱放射のバランスにより決まる

$$F_{\text{total}} + \frac{\Gamma}{\sqrt{4\pi P}} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \epsilon \sigma T_{z=0}^4$$

- 大まかには「可視光で温められ、赤外線で冷える」

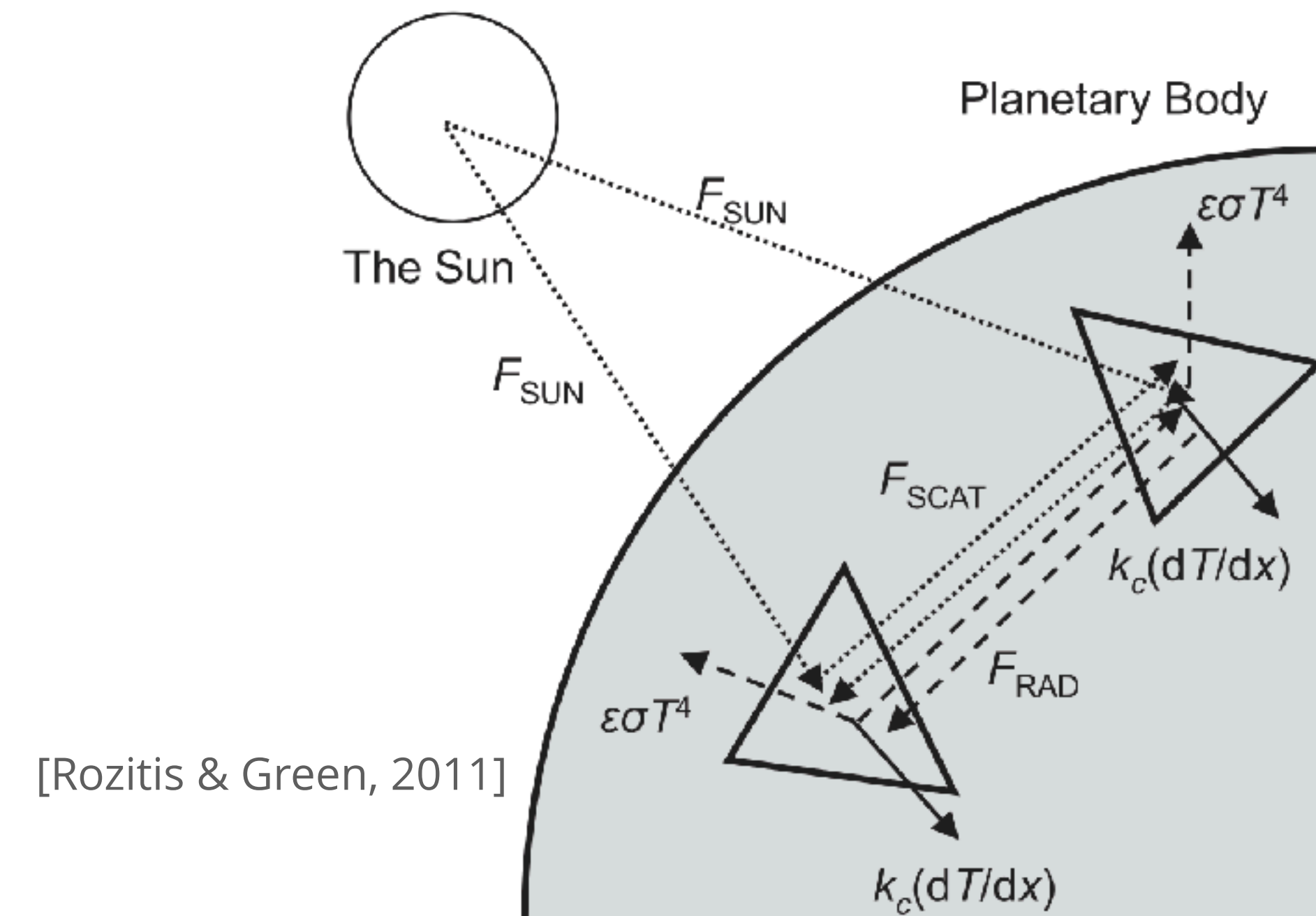
最近の熱物理モデル

	ATPM [Rozitis & Green, 2011; 2012]	Astroshaper [Kanamaru+2021]
3次元形状と影の判定	✓	✓
熱伝導	1次元	1次元
太陽光の多重散乱 F_{SCAT}	✓	一重散乱のみ
熱放射の再吸収 F_{RAD}	✓	✓
表面凹凸による赤外線ビーミング	✓	準備中

- 熱放射が生む力を表面全体で積分する

$$df_i = -\frac{2}{3} \frac{\epsilon \sigma T^4}{c_0} \hat{n}_i dS_i$$

- 重心運動への寄与はYarkovsky、
回転運動への寄与はYORP



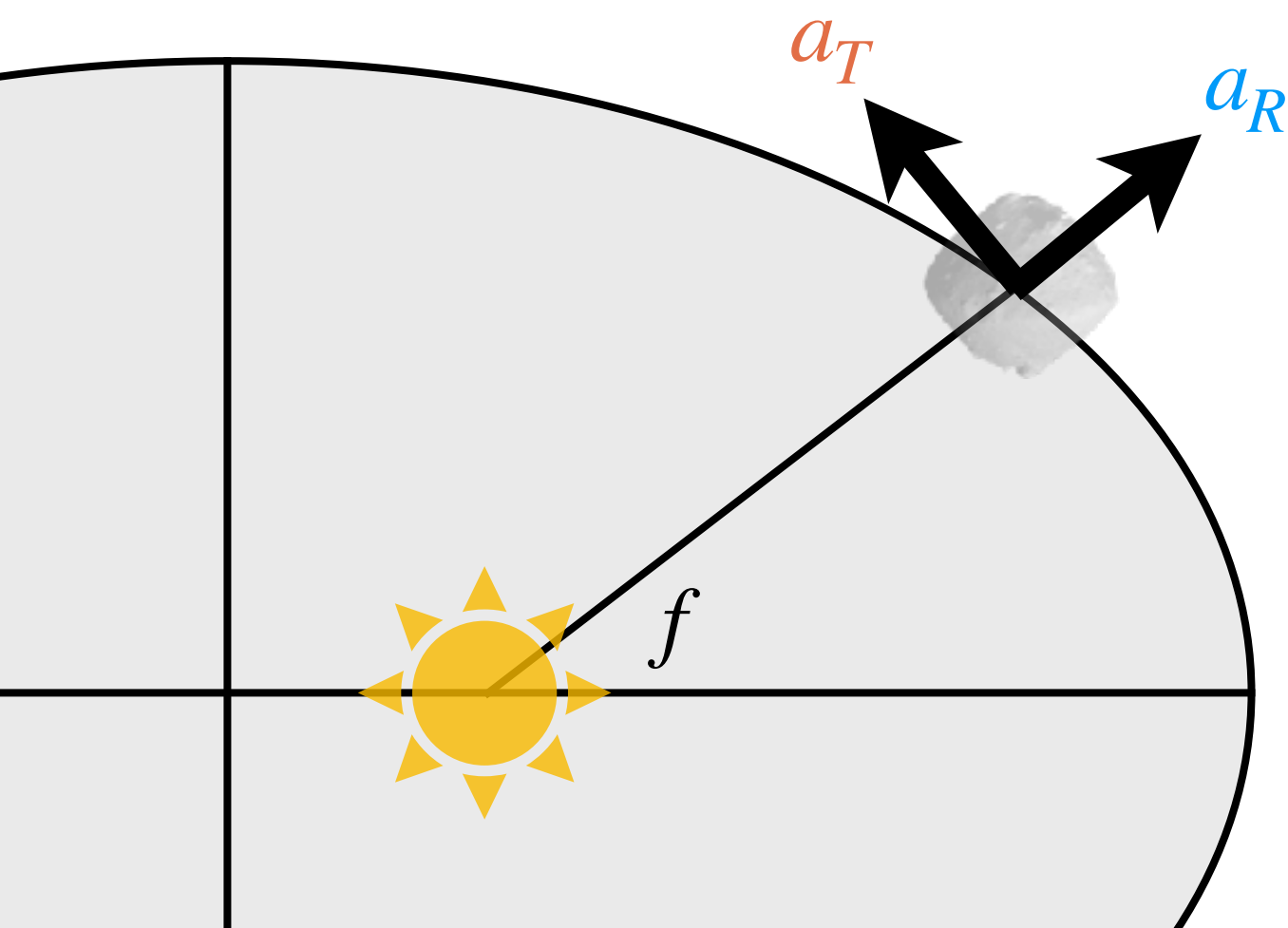
[Rozitis & Green, 2011]

小惑星 Ryugu に働く Yarkovsky 効果

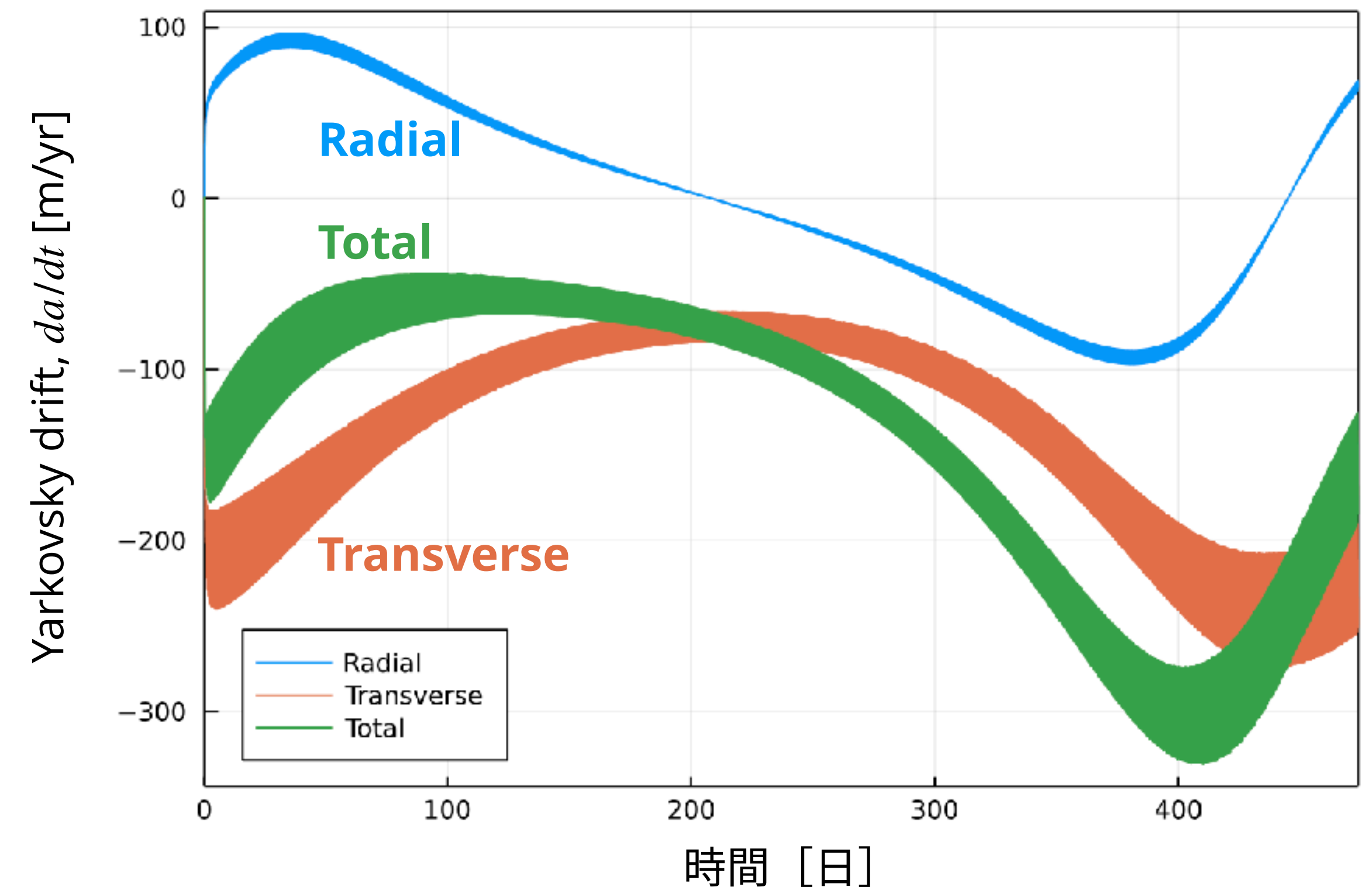
Yarkovsky 効果の計算

- Ryuguの現在の軌道要素と熱物性値 ($k = 0.1, \Gamma = 276$) を使って熱物理計算を行った [Okada+2020; Shimaki+2020]
- 熱放射によって生じる加速度 (a_R, a_T, a_N) を計算し、軌道長半径の変化率へと換算した [Farnocchia+2021]

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n\sqrt{(1-e^2)}} \left[e \sin f a_R + \frac{a(1-e^2)}{r} a_T \right]$$



Yarkovsky による加速度の時間変化 (1 公転分)



- 軌道平均すると、移動速度は $da/dt = -138.6 \text{ m/yr}$ (逆行自転のため内向きに軌道進化)
- Bennuは $da/dt = -284.6 \pm 0.2 \text{ m/yr}$ [Farnocchia+2021]

小惑星の軌道・自転のダイナミクスと非重力効果

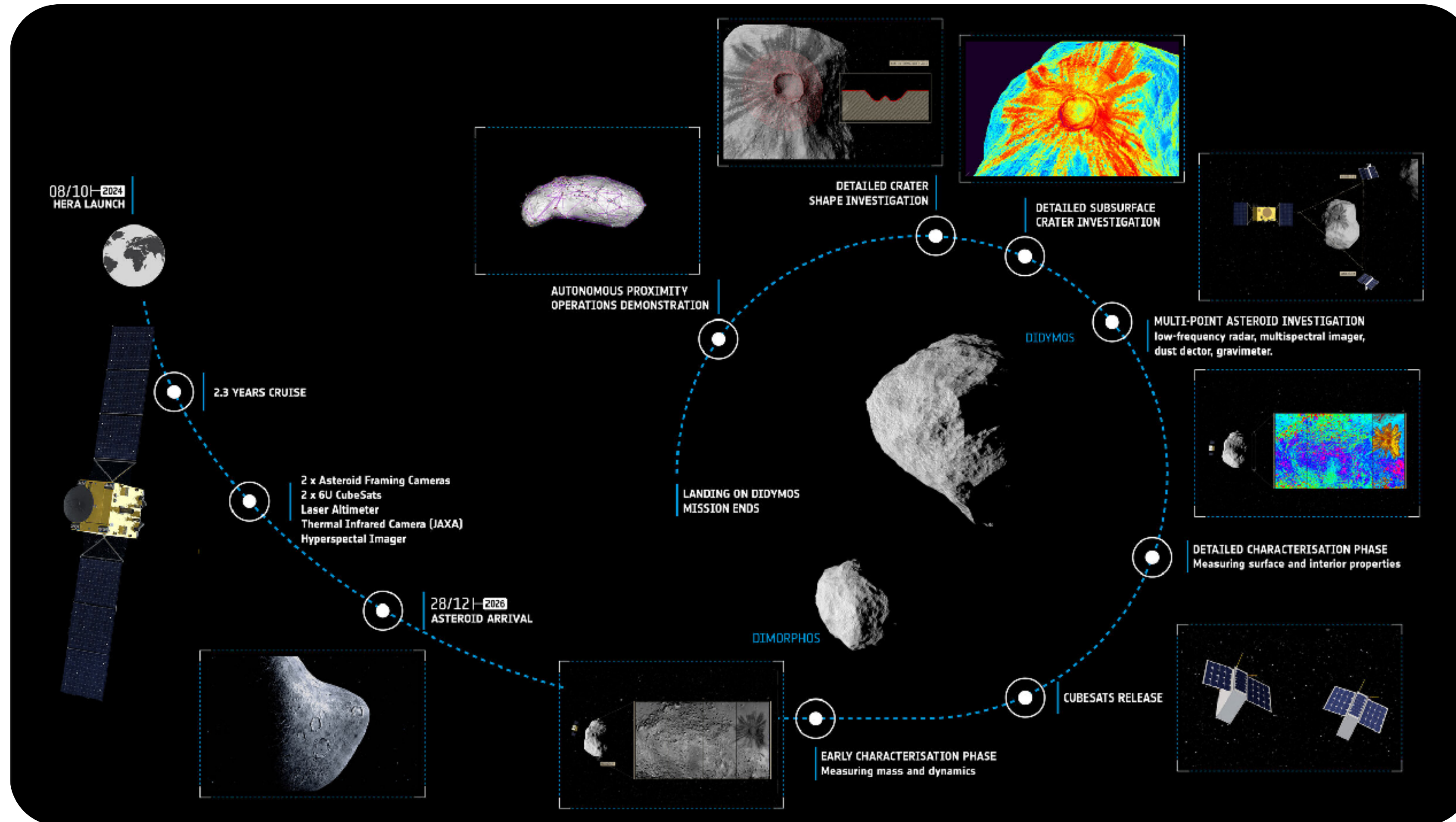
1 小惑星の力学と熱物理

2 Hera に向けた科学検討

- Hera ミッションの概要
- 科学検討の取り組み

3 小惑星の軌道変更と非重力効果

Hera ミッションの概要



2024 打上げ

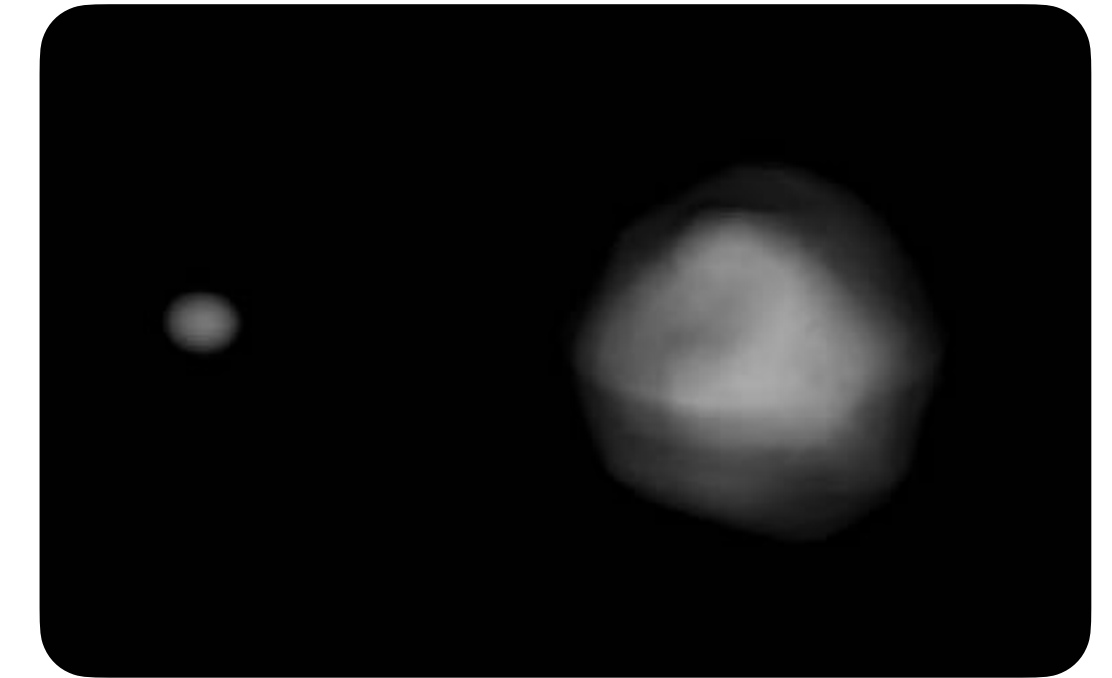
2025 火星フライバイ

2027 小惑星ランデブー

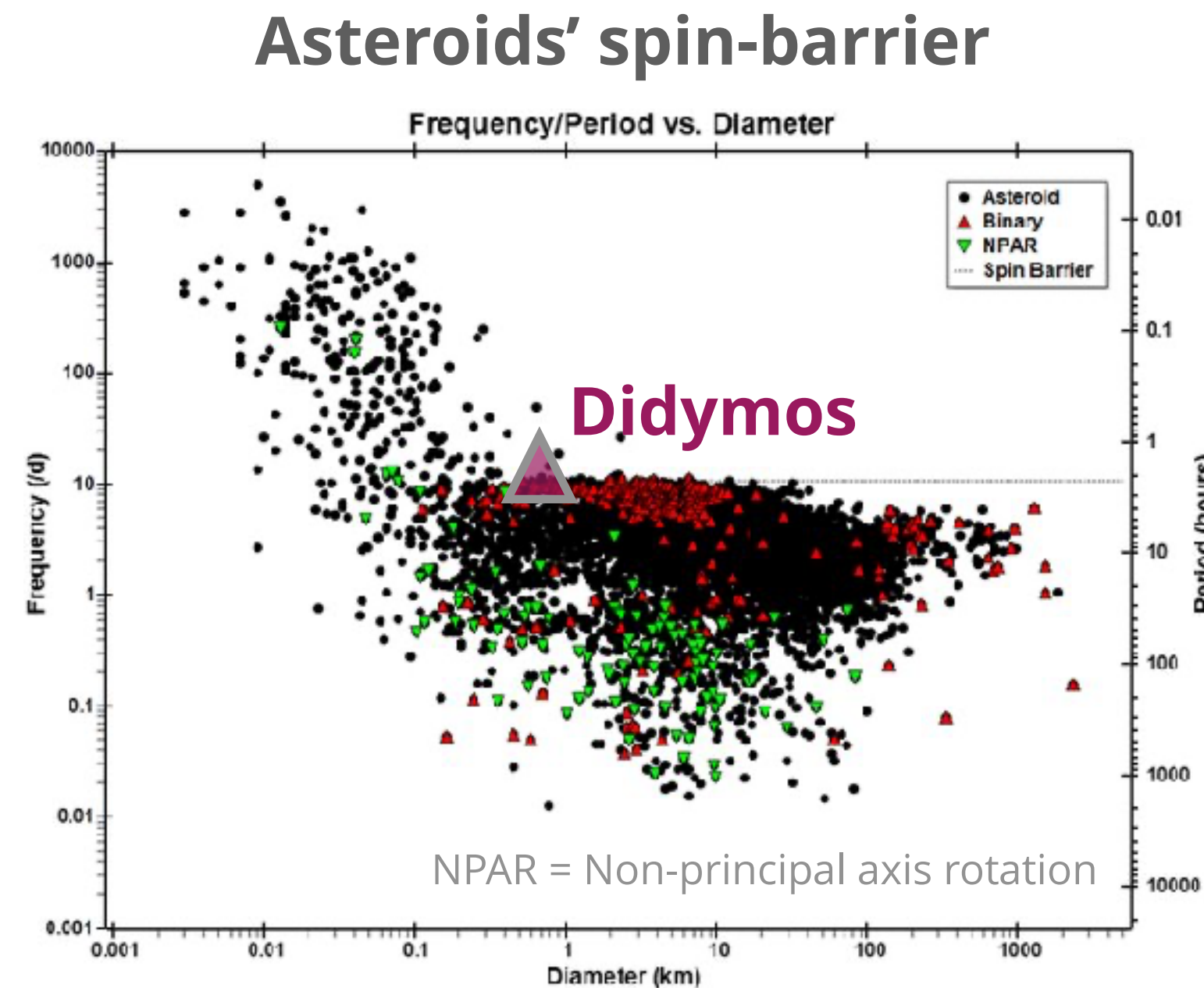
- 目標天体：二重小惑星
Didymos & Dimorphos
- NASA/DARTが形成した
クレーターの詳細観測
- 人工衝突による小惑星の
軌道変更の実現性を調べる
- ISAS/JAXAからは、熱赤外
カメラ (TIRI)を提供

二重小惑星 Didymos & Dimorphos

- 潜在的に危険な小惑星 (Potentially hazardous asteroid, **PHA**)
- スペクトル型：Xk (SMASSII分類) [Binzel+2004; DeLeón+2010]
- ラブルパイル小惑星の **spin-barrier** (2.2 h) に近い自転周期
衛星の公転周期からバルク密度が推定された： $2,170 \pm 350 \text{ kg/m}^3$ [Naidu+2020]



[Naidu+2016, AIDA workshop]



[Warner+2009; Hestroffer+2019]

	Didymos	Dimorphos
直径	780 ± 80 m	170 ± 30 m
自転周期	2.259 h	11.93 ± 0.01 h
公転周期	770.1 days	自転と同期している
軌道長半径	1.644 au	1.19 ± 0.03 km
軌道離心率	0.3838	< 0.05
軌道傾斜角	3.408°	—

[Small-Body Database by JPL]

二重小惑星の力学 — 潮汐 vs. BYORP —

[Walsh & Jacobson, 2015. in Asteroids IV]

潮汐進化

- NEやMBの二重小惑星 ($D < 10$ km) のほとんどは **潮汐固定**されている

[Richardson & Walsh, 2006; Pravec+2006]

- 衛星の公転よりも主星が速く自転する場合、主星は **自転減速**し、衛星は主星から **遠ざかる**

(地球と月のように)

$$\frac{da}{dt} = \frac{3k_{2,p}\omega_d q \sqrt{1+q}}{Q_p a^{11/2}}$$

ここで、 $k_{2,p}$ は主星の2次のラブ数、 $\omega_d = \sqrt{\frac{4}{3}\pi\rho G}$ は臨界自転速度、 $q = M_s/M_p$ は主星と衛星の質量比、 $Q_p = 1/2\varepsilon$ は主星の潮汐散逸の係数

Binary YORP (BYORP)

- 潮汐固定された二重小惑星の軌道が受ける熱的な効果 [Ćuk & Burns, 2005]

- 軌道長半径の進化

$$\frac{da}{dt} = \frac{3H_\odot B_s a^{3/2} \sqrt{1+q}}{2\pi\rho\omega_d R_p^2 q^{1/3}}$$

ここで、 ρ は主星と衛星の密度、 $H_\odot = \frac{F_\odot}{a_\odot^2 \sqrt{1-e_\odot^2}}$ 、 F_\odot は太陽定数、

B_s は天体形状によって決まる衛星のBYORP定数

- $B_s > 0$ なら軌道は広がり、 $B_s < 0$ なら軌道は縮む
BYORPでHill半径の外まで軌道が広がると **split pair** になる
あるいは、衝突して **contact binary** になる

- BYORP ($da/dt < 0$) と潮汐 ($da/dt > 0$) がつりあう場合

$$a^* = \left(\frac{2\pi k_{2,p} \omega_d^2 \rho R_p^2 q^{4/3}}{B_s H_\odot Q_p} \right)^{1/7} \Leftrightarrow \frac{B_s Q_p}{k_{2,p}} = \frac{2\pi \omega_d^2 \rho R_p^2 q^{4/3}}{H_\odot a^7}$$

- BYORPは検出できるか？

軌道決定から内部構造に起因するパラメータが得られる

二重小惑星系の力学的な寿命は？ (c.f. 小惑星の15%が衛星をもつ)

WG4-HLP-NGA (Non-Gravitational Acceleration)

Input from instruments

AFC Asteroid Framing Camera

TIRI Thermal Imager

RSE Radio Science Experiment

Cubesats Cameras

ISL InterSatellite Link

Interactions with HLPs

DO Dimorphos Orbital State

GA Gravitational Acceleration

SDD Satellite/Dust/Dust Ejection

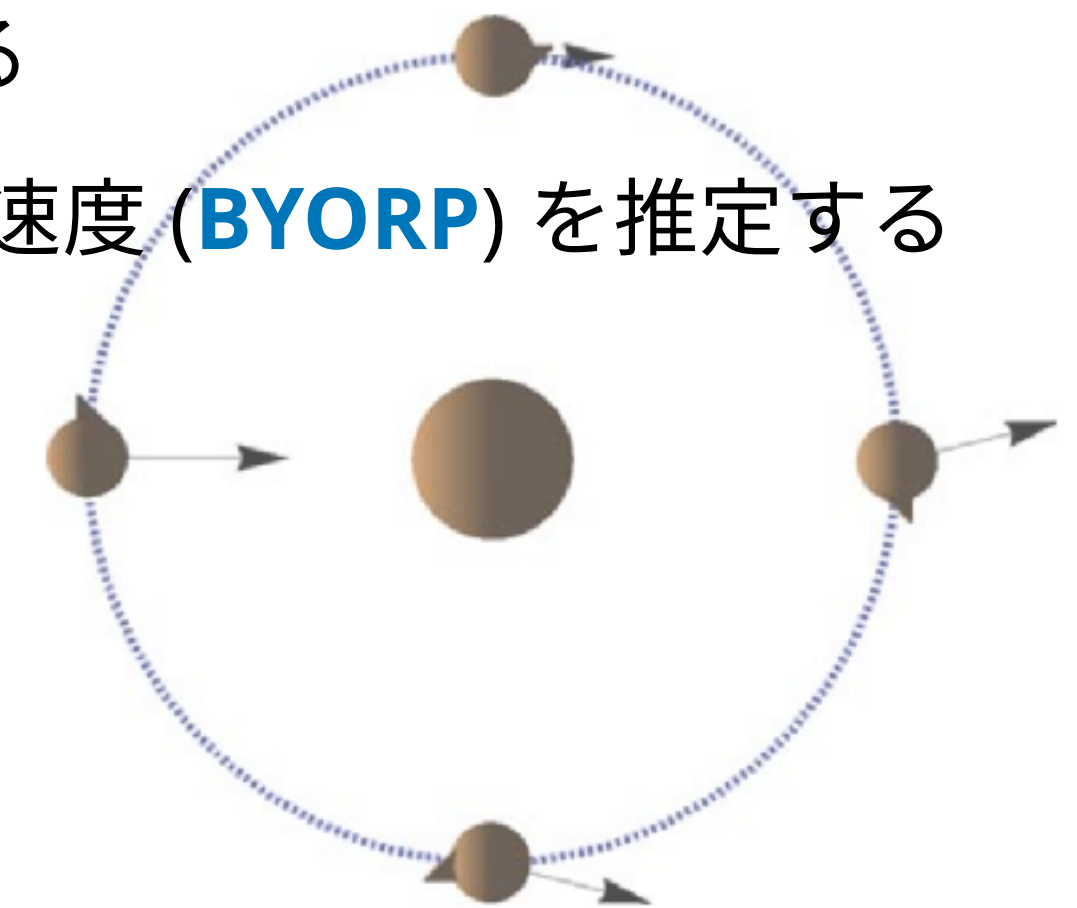
SV Shape/Volume

精密軌道決定

- ピサ大学が担当する (Lead: Dr. G. Tommei) [Zannoni+2018]
 - ➡ 二重小惑星の軌道と自転に関するパラメータを取得する

熱赤外観測とモデリング

- TIRIによる熱画像と熱物理モデルとの比較
 - ➡ 表面温度と熱物性値を取得する
 - ➡ Dimorphos にかかる非重力加速度 (**BYORP**) を推定する



[McMahon & Scheeres, 2010]

小惑星の軌道・自転のダイナミクスと非重力効果

1 小惑星の力学と熱物理

2 Hera に向けた科学検討

3 小惑星の軌道変更と非重力効果

- Yarkovsky効果を使ったアイデアの紹介

小惑星の軌道変更



Impulsive methods

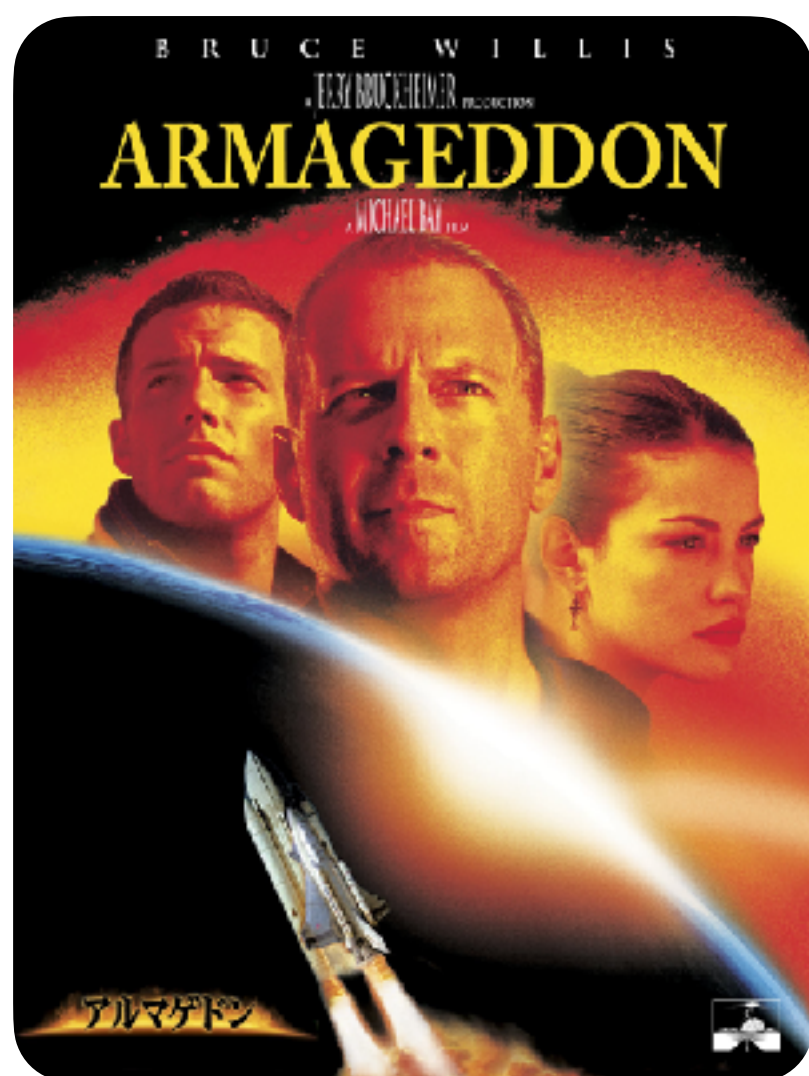


Slow push/pull methods

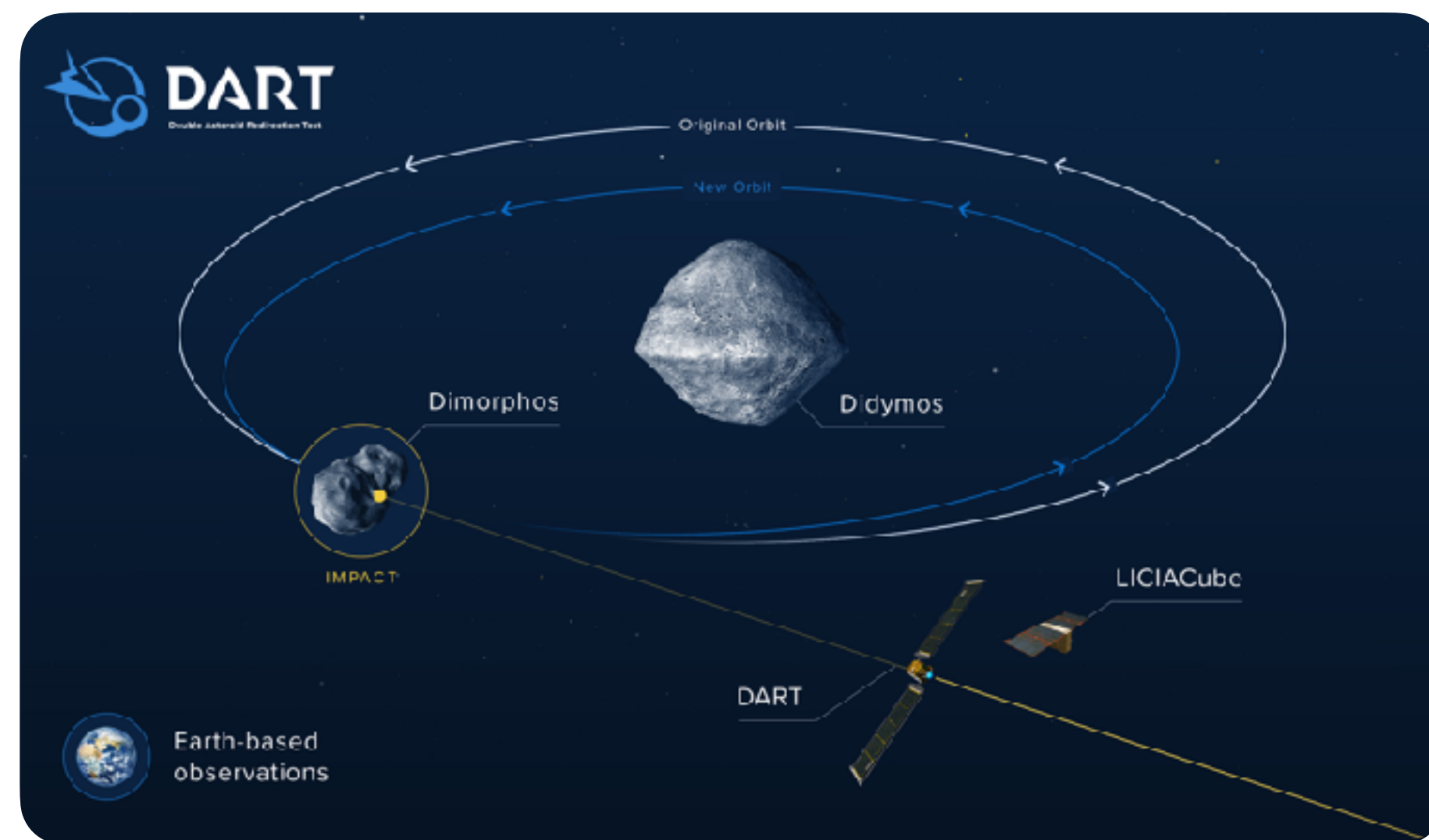


Exotic methods

Nuclear devices の例



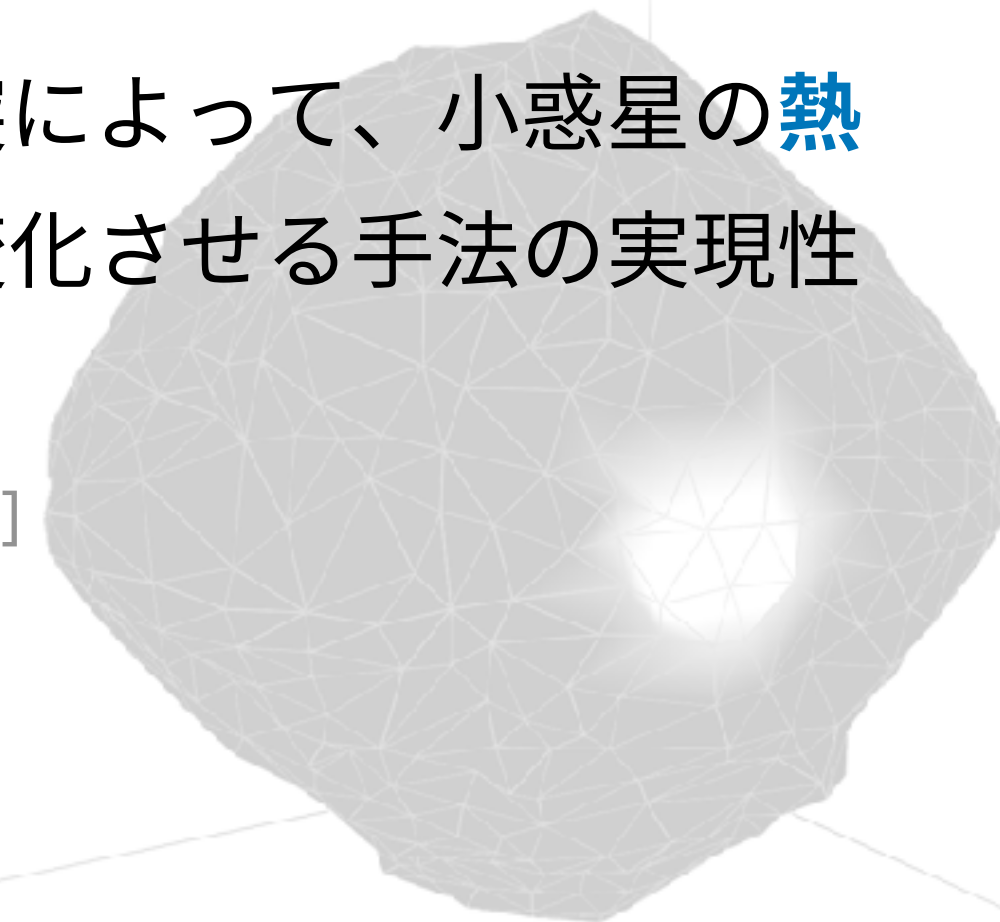
Kinetic impactor の例



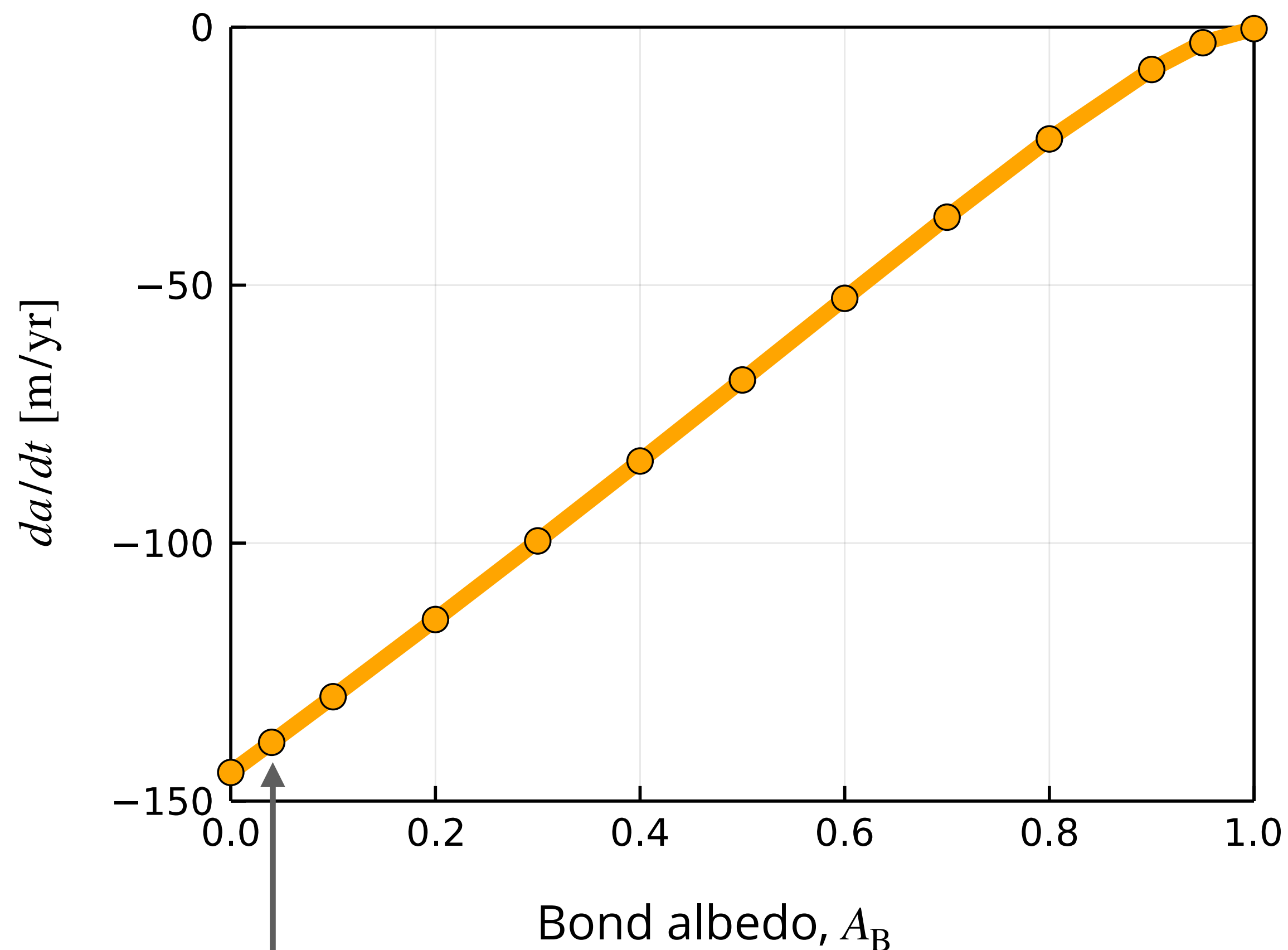
熱放射の摂動 (Yarkovsky) を 利用して、軌道変更は可能か？

- 探査機の衝突によって、小惑星の**熱放射特性**を変化させる手法の実現性を検討した。

[e.g., Spitale2002]



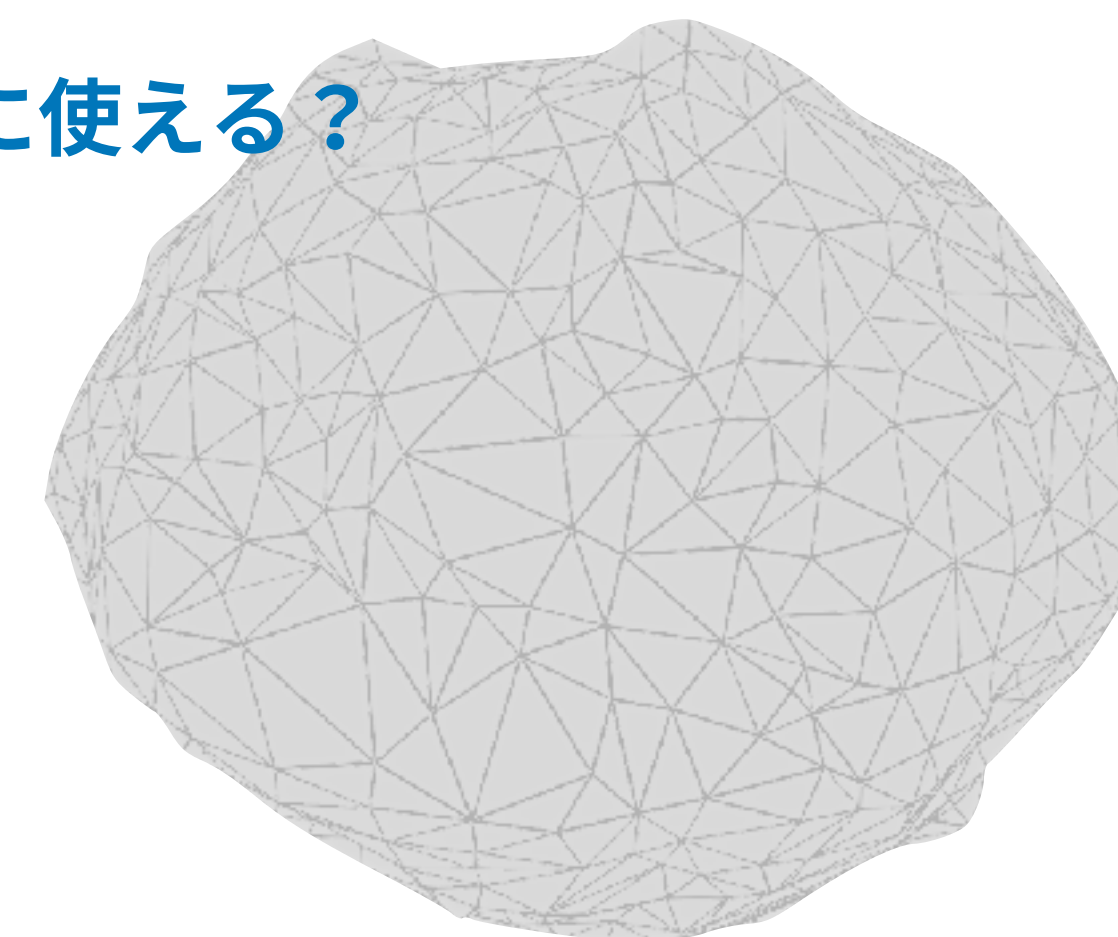
Yarkovsky 効果のアルベド依存性



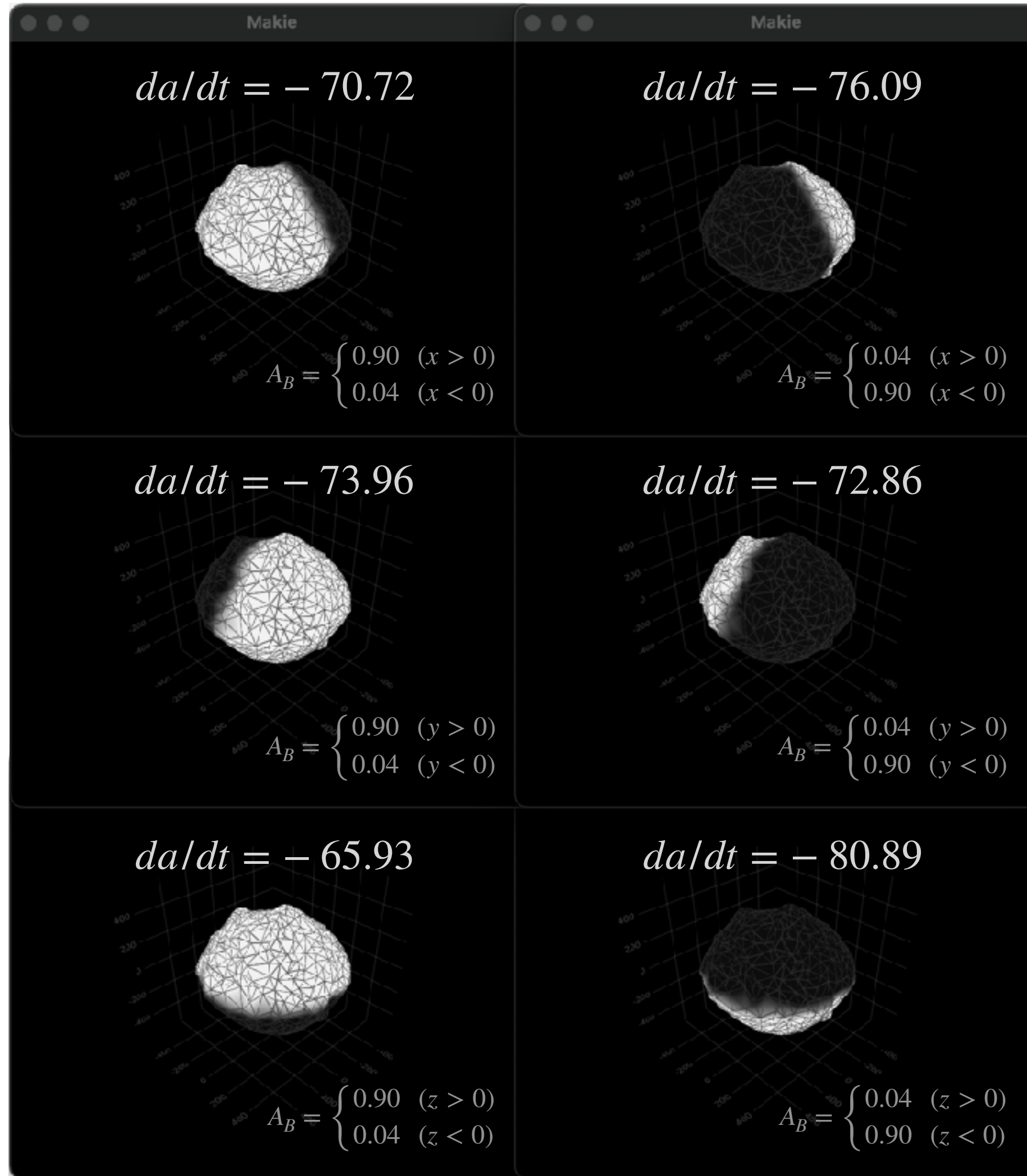
Ryugu nominal ($A_B = 0.04$)
 $da/dt = -138.6$ [m/yr]

Yarkovsky 効果の A_B 依存性

- アルベド（反射能） A_B が小さくなると、天体表面の温度が上昇し、熱放射が増える
 - ➡ Yarkovsky 効果が大きくなる
- 逆に、 $A_B = 1$ では、Yarkovsky 効果は働かない
 - ➡ 天体表面を白く塗ると、熱放射による摂動が抑制される
 - ➡ **小惑星の軌道変更に使える？**



小惑星を白く塗って軌道変更を試みる



◀ 半球を $A_B = 0.9$ で塗る

- Yarkovsky効果による移動速度は、およそ半分強になる

▼ 半径 100 m 圏内を $A_B = 0.9$ で塗る

- スポット中心 (N4.8°, E79°) の場合、 $da/dt = -136.3$ [m/yr]

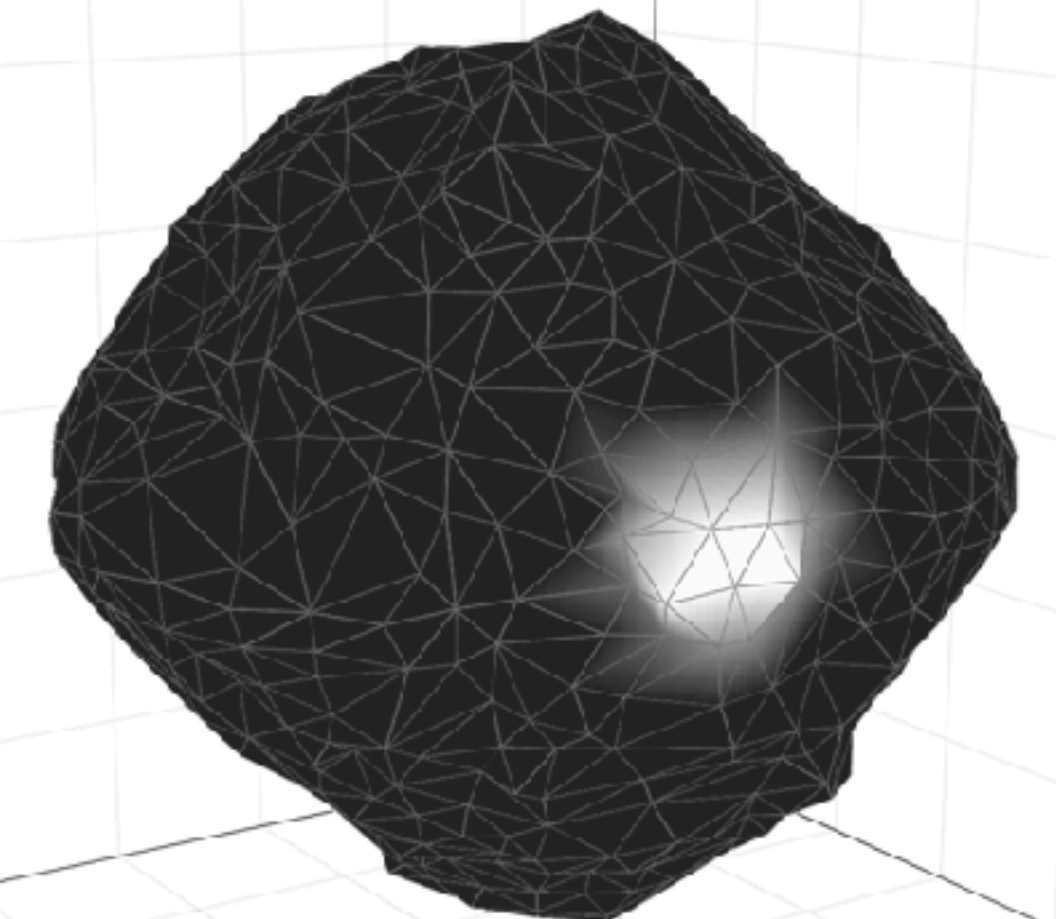
軌道変更の効果は、スポットの面積による (↑全球の1.2%)

軌道変更による変位 $\Delta r \sim -\frac{3}{2}\mu^{\frac{1}{2}}a^{-\frac{3}{2}}\left(\frac{da}{dt}\right)(\Delta t)^2$ は、1年で 17 m、100年で 170 km

➡ 大きな軌道変更を行うには、
より多くの表面積を (より白く)
覆う必要がある

➡ 宇宙で使える白い塗料が欲しい

➡ サイズの小さな天体は、
その分効果も大きくなる



小惑星の軌道・自転のダイナミクスと非重力効果

小惑星の力学

- 小惑星の力学進化に影響を及ぼす**非重力効果**は、精密な軌道予測にも重要である。
- 熱放射の摂動による軌道進化は**Yarkovsky**効果、自転進化は**YORP**効果と呼ばれる。

Heraに向けた科学検討

- WG4 - NGAでは、ピサ大学と協力して、二重小惑星 Didymos-Dimorphos に働く非重力効果 (**BYORP**) の検出を目指している。

小惑星の軌道変更と非重力効果

- 小惑星表面のアルベドを変化させることで、Yarkovsky 効果の大きさが変わり、100年スケールではそれなりの変位量になる可能性がある。